Vol.13, No.1, Spring 2024, pp.317-338 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/geoeh.2022.76706.1227 Open access

The Morphodynamics of Sand Dunes and Wind Patterns (Case Study: New and Young Arg in Southeast of Qom)

Naser Mashhadi[a*]

[a] *Assistant Professor in Geomorphology (Wind Erosion), University of Tehran, Tehra, Iran*

Received: 15 May 2022 ***Revised: 28 June 2022*** ***Accepted: 11 July 2022***

Abstract

The study of dunes morphology provides a valuable tool for investigating wind systems and the identification of sand sources (removal region). The wind direction is the primary factor controlling the dune shape and elongation. In deserts jubject to wind from different directions and with comparable magnitude, dunes are formed having different morphologies. The sand dunes are either perpendicular or parallel to the wind direction. The purpose of this study was to analyze the morphology of sand dunes under bimodal winds using conventional models. Observations showed that the linear (seif) dunes formation are due to the elongation of a barchan horn. These dunes are created by a bimodal wind regime with a strong peak from the result of northwest and west winds and a weaker peak from the east winds with a divergence angle of 135°. Sinuous crest lines of seif dune grow directly by west and east winds. The study showed that the evolution trend of the sand dunes of the region, under the strong northwest wind, first shield dune transforms into a dihedral barchans. At this stage, wind erosion on the back of the sand pile (shield dune) leads to the formation of a crest perpendicular to the wind direction and then to the formation of a slip face downwind. According to the effect of the magnitude and change of direction in the Westerly and Easterly winds, the western wing of barchan begins to extend and turns into a dentate seif dune.

Keywords: Erg, pre-Barchanic, Sand dunes, seif dune, Shield dune.

*. Email: nmashhad@ut.ac.ir Tel:+989122979442

How to cite this Article: Mashhadi, N. (2024). The Morphodynamics of Sand Dunes and Wind Patterns (Case Study: New and Young Arg in Southeast of Qom). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 13(1), 317-338.

DOI: 10.22067/geoeh.2022.76706.1227

Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

Geography and Environmental Hazards

Volume 13, Issue 1 - Number 49, Spring 2024

https://geoeh.um.ac.ir

https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.76706.1227

جغرافیا و مخاطرات محیطی، سال سیزدهم، شمارۀ چهل و نهم، بهار ۱٤۰۳، صص ۳۳۸-۳۱۷

مقاله پژوهشی

مورفودینامیک تپه‌های ماسه‌ای و الگوهای باد
(مطالعه موردی: ارگ جدید و جوان جنوب شرق قم)

ناصر مشهدی[۱] -دکتری آبخیزداری، استادیار، دپارتمان علوم زمین، مرکز تحقیقات بین‌المللی بیابان، دانشگاه تهران

تاریخ دریافت: ۱٤۰۱/۲/۲۵ تاریخ بازنگری: ۱٤۰۱/٤/۷ تاریخ تصویب: ۱٤۰۱/٤/۲۰

چکیده

مطالعه مورفولوژی تپه‌ها، ابزار ارزشمندی را در بررسی سیستم‌های بادی و در نتیجه شناسایی قطاع منابع ماسه فراهم می‌کند. جهت باد عامل اصلی کنترل شکل و کشیدگی تپه است. در بیابان‌های در معرض باد از جهت‌های مختلف و با اندازه‌های قابل‌مقایسه، تپه‌ها با مرفولوژی متفاوت شکل می‌گیرند. این تپه‌ها یا عمود یا موازی با جهت باد هستند. هدف این مقاله، تجزیه‌وتحلیل مرفولوژی تپه‌های ماسه‌ای تحت بادهای دوجهته با استفاده از مدل‌های مرسوم است. مشاهدات نشان داد که شکل‌گیری تپه‌های خطی (سیف)، حاصل کشیدگی یک بازوی بارخان است. به‌طوری که، این تپه‌ها توسط یک رژیم بادی دومدال با یک پیک قوی از برآیند بادهای شمال غربی و غرب و یک پیک ضعیف‌تر از بادهای شرقی با زاویه واگرائی ۱۳۵ درجه ایجاد می‌شوند. خطوط تاج سینوسی تپه سیف توسط بادهای شرقی و غربی رشد می‌کنند. مطالعات همچنین نشان داد که روند تکامل تپه ماسه‌ای منطقه، تحت باد قوی شمال غرب ابتدا تپه سپر تشکیل و سپس تبدیل به بارخان دو وجهی (ناقص) می‌شود. در این مرحله، فرسایش باد در پشت تپه سپر، منجر به تشکیل یک تاج عمود بر جهت باد و به همین ترتیب به

۱ نویسنده مسئول: ۰۹۱۲۲۹۷۹٤۲۲ Email:nmashhad@ut.ac.ir

نحوه ارجاع به این مقاله:

مشهدی، ناصر. (۱٤۰۳). مورفودینامیک تپه‌های ماسه‌ای و الگوهای باد (مطالعه موردی: ارگ جدید و جوان جنوب شرق قم). جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۱۳(۱). صص ۳۳۸-۳۱۷.

https://doi.org/10.22067/geoeh.2022.76706.1227

شکل‌گیری یک دامنه پرشیب در پائین‌دست باد می‌گردد. با توجه به تأثیر بزرگی و تغییر جهت در بادهای غربی و شرقی، بازوی غربی بارخان شروع به گسترش می‌کند و تبدیل به تپه سیف دندانه‌ای می‌شود.

کلیدواژه‌ها: ارگ، پیش بارخانی، تپه‌های ماسه‌ای، تپه سیف، تپه سپر.

۱- مقدمه

در اقالیم خشک، باد و منابع ماسه دو عنصر اصلی در شکل‌گیری ناهمواری‌های ماسه‌ای هستند (مشهدی و همکاران، ۲۰۰۷). جهت باد، مسیر و کشیدگی[۱] تپه‌های ماسه‌ای را تعیین می‌کند و رژیم‌های باد فرم‌های[۲] مختلف تپه‌های ماسه‌ای را به وجود می‌آورند (ژندا[۳]، ۱۹۸۹).

فراوانی و تنوع تپه‌های ماسه‌ای در مناطق بیابانی منجر شده که هیچ طبقه‌بندی پذیرفته شده‌ای وجود نداشته باشد که به تمام انواع تپه‌های شناخته شده اشاره کند (تسوار[۴] و همکاران، ۲۰۰٤). بر این اساس، طبقه‌بندی مورفودینامیک تپه‌ها در الگوهای مختلف پیشنهاد و ارائه گردیده است. الگوهایی همچون الگوهای رژیم باد و مورفودینامیک تپه ماسه‌ای (منگو[۵]، ۱۹۸٤؛ تسوار و همکاران، ۲۰۰٤؛ مک کی[۶]، ۱۹۷۹ و لنکستر[۷]، ۱۹۸۲). الگوهای قدرت باد، شار ماسه و مورفودینامیک تپه‌های ماسه‌ای (روبین[۸] و هانتر[۹]، ۱۹۸۷؛ روبین و ایکدا[۱۰]، ۱۹۹۰؛ رفعت[۱۱] و همکاران، ۲۰۱۰؛ پارتلی[۱۲] و همکاران، ۲۰۰۹؛ کوک[۱۳] و همکاران، ۱۹۹۳ پای[۱٤] و تسوار، ۲۰۰۸) و الگوی فراوانی، مدت‌زمان وزش باد و مورفودینامیک تپه ماسه‌ای (پارتلی و همکاران، ۲۰۰۹) ارائه شده است.

مطالعات الگوهای رژیم باد و مورفودینامیک تپه‌های ماسه‌ای نشان داده که مرفولوژی تپه‌های ماسه‌ای را می‌توان در سه رژیم اصلی باد طبقه‌بندی کرد. (الف) تپه‌های هلالی و زنجیره عرضی، تحت یک باد یک جهته غالب، (ب) تپه‌های خطی، نتیجه باد دو جهته و (ج) تپه‌های ستاره‌ای، زمانی که بادها از سه جهت یا بیشتر می‌وزند (تسوار و همکاران، ۲۰۰٤؛ منگو،۱ ۹۸٤).

1 Alignment
2 Forms
3 Zhenda
4 Tsoar
5 Mainguet
6 McKee
7 Lancaster
8 Rubin
9 Hunter
10 Ikeda
11 Reffet
12 Parteli
13 Cooke
14 Pye

اکثر تپه‌های ماسه‌ای در جهان به‌وسیله بادهایی که بیشتر از یک جهت می‌وزند شکل می‌گیرند. بادهای دو جهته که به‌طور دوره‌ای بین دو جهت اصلی نوسان دارند، متداول‌ترین بادها در بزرگ‌ترین بیابان‌های ماسه‌ای هستند (مک گی، ۱۹۷۹؛ روبین، تسوار و بلومبرگ[۱]، ۲۰۰۸؛ فرایبرگ[۲] و دین[۳]، ۱۹۷۹).

رژیم باد دو جهته، تپه‌هایی با مرفولوژی طولی[۴] (بگنولد[۵]، ۲۰۱۲) و یا خطی و کشیده[۶] (منگو، ۱۹۸٤) را به وجود می‌آورند. تپه‌های خطی ساده[۷] (منگو، ۱۹۸٤) یا سیف[۸] (پارتلی، دیوران[۹]، تسوار، شوامل[۱۰] و هرمان[۱۱]، ۲۰۰۹)، نوع تپه غالب تحت رژیم‌های دوجهته باد هستند. تپه‌های خطی ساده (سیف)، پایه‌ای برای گسترش و تکامل تپه‌های خطی مرکب[۱۲] همانند سیلک[۱۳] می‌باشند (منگو، ۱۹۸٤).

مطالعات الگوی قدرت باد، شار ماسه و مورفودینامیک تپه ماسه‌ای نشان داده، که مورفولوژی تپه ماسه‌ای رابطه تنگاتنگی با قدرت و زاویه بین دو باد غالب یا فرساینده دارد. هنگامی‌که مقدار و بزرگی هر دو باد قابل‌مقایسه و توجه باشند، روند تپه‌ها تنها، به زاویه بین دو جهت شار ماسه بستگی دارد (روبین و هانتر، ۱۹۸۷؛ روبین و ایکدا، ۱۹۹۰). در این الگو، تپه‌های ماسه‌ای عرضی، مایل و طولی شکل می‌گیرند. این تغییر مرفولوژی تنها توسط دو پارامتر زاویه بین دو باد و نسبت ماسه حمل شده در دو جهت ایجاد می‌شوند (روبین و هانتر، ۱۹۸۷؛ روبین و ایکدا، ۱۹۹۰). تپه‌هایی با یک روند مایل وقتی مشاهده می‌شوند که حمل رسوب در یک جهت بر جهت‌های دیگر غالب شود (روبین و هانتر، ۱۹۸۷؛ روبین و ایکدا، ۱۹۹۰؛ ورنر[۱۴] و کوکورک[۱۵]، ۱۹۹۷؛ کوکورک و اوینگ[۱۶]، ۲۰۰۵).

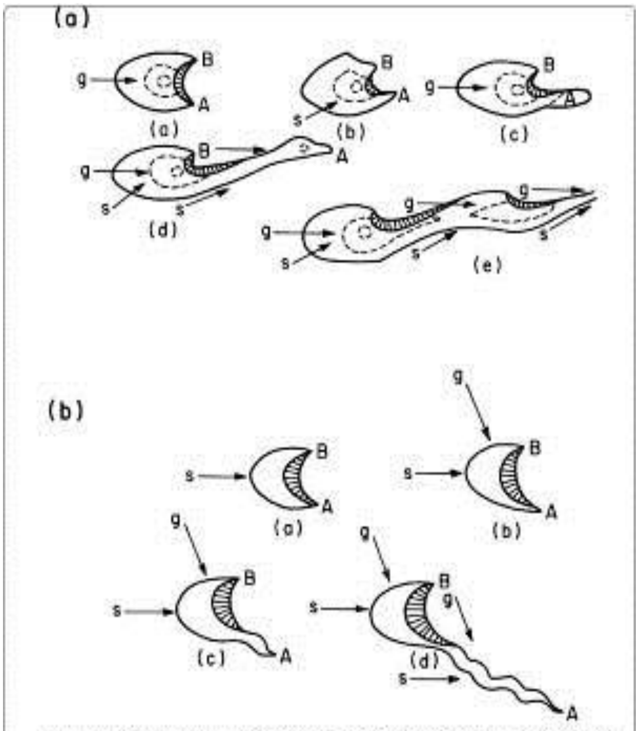
روند کشیدگی تپه‌های ماسه‌ای خطی بستگی به شرایط محلی قابلیت دسترسی به ماسه[۱۷] و قدرت و جهت باد دارد (بگنولد، ۲۰۱۲؛ کوک و همکاران، ۱۹۹۳؛ پای و تسوار، ۲۰۰۸؛ رفعت و همکاران، ۲۰۱۰).

یک مدل پیشنهادی، برای تشکیل تپه‌های خطی ساده یا سیف، تکامل بارخان است (بگنولد، ۱۹٤۱؛ تسوار، ۱۹۸٤). بدین‌صورت که یکی از بازوهای بارخان، به علت تغییرات در جهت باد کشیده می‌شود. در

1 Blumberg
2 Fryberger
3 Dean
4 Longitudinal
5 Bagnold
6 Linear and Elongate
7 Simple linear dunes
8 Seif
9 Durán
10 Schwämmle
11 Herrmann
12 Complex linear dunes
13 Silk
14 Werner
15 Kocurek
16 Ewing
17 Sand availability

این شرایط، یکی از جهت‌های باد دو جهته، جهت اصلی است، یعنی بادی با تداوم T_{W1} که بارخان را شکل می‌دهد. جهت دیگر باد ثانویه است که با باد اصلی زاویه θ_w را ایجاد می‌کند و زمان مشخصه آن T_{W2} است (شکل ۱).

تپه‌های ماسه‌ای فعال و جوان موردمطالعه، با مساحت ۲۲۷ هکتار در شمال کاشان و جنوب شرقی قم واقع شده است. مرفولوژی این تپه‌ها خطی بوده و در طول سه دهه اخیر تشکیل شده‌اند. بررسی‌ها و مقایسه تصاویر ماهواره از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۷ نشان داد که این مجموعه تپه‌های ماسه‌ای در این بازه زمانی تشکیل شده‌اند (**حسنی و همکاران، ۱۳۹۶**). بررسی‌های محلی نیز مؤید تشدید میزان فرسایش بادی و گردوغبار در منطقه است. هدف این مقاله تجزیه‌وتحلیل مرفولوژی تپه‌های ماسه‌ای تحت بادهای دوجهته با استفاده از مدل‌های مرسوم است.



Models for the development of seif dunes from barchans. (a) as suggested by Bagnold (1941) and (b) as modified by Tsoar (1984); s indicates a strong wind and g a gentle wind.

شکل ۱- مدل‌های توسعه تپه‌های سیف از بارخان، (a) بر اساس طرح پیشنهاد شده بگنولد (۱۹۴۱) و (b) بر اساس طرح اصلاح شده تسوار (۱۹۸٤). s: باد قوی و g: باد ملایم

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- ویژگی‌های منطقه موردمطالعه

ارگ جدید و جوان منطقه موردمطالعه (شرق آب شیرین) در جنوب شرقی قم و شمال کاشان واقع شده است، که تحت نفوذ تپه‌های ماسه‌ای خطی ساده، با روند شمالی جنوب است. از نظر موقعیت جغرافیایی در عرض ۳٤ درجه و ۲۱ دقیقه و ۲۹ ثانیه تا ۳٤ درجه و ۲۲ دقیقه و ٤۲ ثانیه شمالی و در طول ۵۱ درجه و ۱۹ دقیقه و ۳۹ ثانیه تا ۵۱ درجه و ۲۰ دقیقه و ۵۲ ثانیه شرقی قرار دارد (شکل ۲). با توجه به فرم تپه‌ها، جهت‌گیری آن‌ها توسط یک رژیم باد دو جهته کنترل و تابع ویژگی‌های آب و هوایی ایستگاه هواشناسی قم است. با توجه به نمودار آمبروترمیک ایستگاه هواشناسی قم، بیشترین شدت خشکی در تیر ماه و دوره خشک از فروردین شروع و تا آبان ماه ادامه دارد. دوره مرطوب از آذر شروع و تا حداکثر اسفند ادامه پیدا می‌کند. با این وصف، منطقه بیشتر تحت تأثیر دوره خشک قرار دارد و بادهای شدید نیز بیشتر در دوره خشک می‌وزند (حسنی و همکاران، ۱۳۹٦).



شکل ۲- منطقه موردمطالعه

به‌منظور مطالعه و تجزیه‌وتحلیل مورفولوژی تپه‌ها، از روش تفسیر چشمی بر روی تصاویر نرم‌افزار Google Earth استفاده شد (قربانی و پاکروان، ۲۰۱۳). در روش مطالعه علاوه بر تصاویر نرم‌افزار گوگل

ارث، به‌صورت تکمیلی از تفسیر عکس‌های هوایی با مقیاس ۱:۵۰۰۰۰ سال ۱۹۵۷ نیز استفاده گردید. این مجموعه داده‌ها با نقشه‌های زمین‌شناسی، توپوگرافی و داده‌های بادسنجی ایستگاه سینوپتیک قم تکمیل گردید.

با توجه به اینکه ارتفاع تپه‌ها از چند متر تجاوز نمی‌کند و همچنین برای برداشت‌های صحرایی و مطالعه توپوگرافی در محل، بازدید میدانی نیز صورت گرفت. سپس مرفولوژی تپه‌ها در قالب مدل‌ها و الگوهای ارائه شده، طبقه‌بندی گردیدند. مورفودینامیک این تپه‌ها، ابتدا به‌تنهایی، بر اساس الگوهای رژیم، فراوانی و قدرت باد، شار ماسه و بعد به‌صورت ترکیبی مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفت.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- آنالیز باد

به‌منظور شناسایی ویژگی‌های باد در رابطه با شکل‌گیری مرفولوژی تپه‌های ماسه‌ای سه موضوع گل‌باد، گل‌توفان و گل‌ماسه موردبررسی قرار گرفتند. از طرفی بررسی‌های مرفولوژی تپه‌ها نشان داد که داده‌های بادسنجی ایستگاه قم بیشترین تأثیر را بر ایجاد و گسترش تپه‌ها داشته‌اند، بنابراین داده‌های این ایستگاه مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفت.

- گلباد

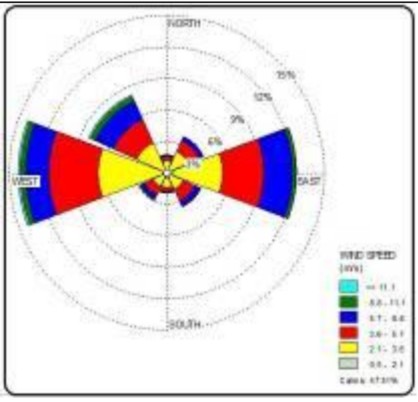
به‌منظور بررسی بادهای غالب یا بادهای با بیشترین فراوانی منطقه، از داده‌های بادسنجی ایستگاه سینوپتیک قم در بازه زمانی ۱۳۹۵-۱۳٦۹، برای رسم گل‌باد سالانه استفاده گردید (شکل ۳).

با توجه به شکل ۳، مشاهده می‌شود که در ٤۷ درصد از توزیع فراوانی بادها، هوا آرام است و نیز وزش بادها از سمت غرب و سپس از سمت شرق بیشترین فراوانی را دارند. بر اساس نمودار گل‌باد، بادهای با سرعت ۳/٦-۵/۷ متر بر ثانیه بیشترین فراوانی را به خود اختصاص داده‌اند (حسنی و همکاران، ۱۳۹٦).

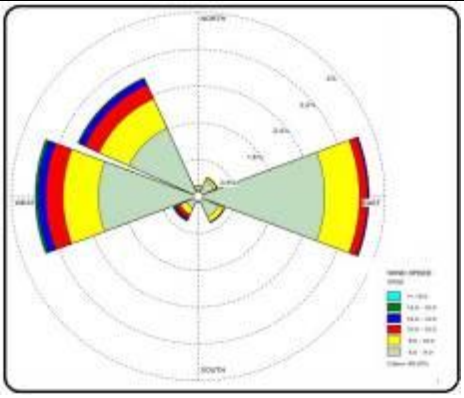
- گل‌توفان

بر اساس بادهای با سرعت‌های بیشتر از ٦/۵ متر بر ثانیه (بادهای فرساینده)، گل‌توفان سالانه ایستگاه سینوپتیک قم در دوره آماری ۱۳٦۹-۱۳۹۵، ترسیم گردید (شکل ٤).

با توجه به گل‌توفان سالانه ایستگاه قم، مشاهده می‌شود که وزش بادهای فرساینده غرب و شمال‌غرب با فراوانی و سرعت بیشتر از بادهای سمت شرق هستند. با توجه به همین نمودار، بادهای ٦/۵-۸ و ۸-۱۰ متر بر ثانیه، بیشترین فراوانی را به خود اختصاص داده‌اند (حسنی و همکاران، ۱۳۹٦).



شکل ۳- گل‌باد سالانه ایستگاه سینوپتیک قم در دوره آماری ۱۳۶۹-۱۳۹۵



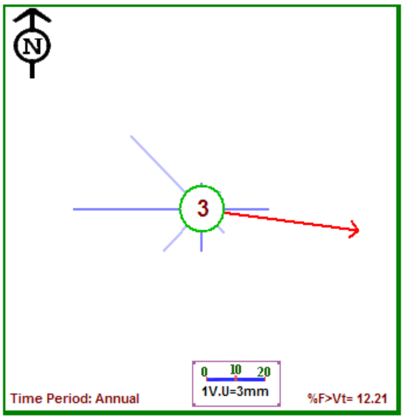
شکل ٤- گل‌توفان سالانه ایستگاه سینوپتیک قم در دوره آماری ۱۳۹۵-۱۳۶۹

- گل‌ماسه

به‌منظور محاسبه‌ی مقدار و جهت نهایی حرکت ماسه و نیز تعیین دبی حمل ماسه، گل‌ماسه سالانه ایستگاه قم موردمطالعه و ترسیم گردید (شکل ٥).

همان‌گونه که گل‌ماسه سالانه ایستگاه قم نشان می‌دهد، جهت نهایی حمل ماسه، به سمت شرق و کمی متمایل به جنوب است و توان حمل ماسه، سالیانه ۲۰۲ واحد برداری است که بر اساس طبقه‌بندی فرایبرگر و دین (۱۹۷۹) توان‌فرسایشی باد، متوسط است. مجموع ماسه جابه‌جاشده در واحد عرض در طول یک سال TSF[1]، برابر ۱۸/۹۸ تن و دبی جریان ماسه DSF[2]، برابر ۸/٦۱ تن بر متر در سال است. با توجه به شاخص UDI[3] محاسبه شده در قم که برابر ۰/٤٥٤ است، می‌توان نتیجه گرفت که قم دارای بادهای دو جهته است که زمینه را برای ایجاد انواع تپه‌ها خطی فراهم می‌کند (توکلی فرد و همکاران، ۱۳۹۱).

1 Total Sand Flux
2 Discharge Sand Flow
3 Uni Directional Index



Sand Rose indices	
DPt	202
RDP	91.662
RDD	97
RDP/DPt	0.454

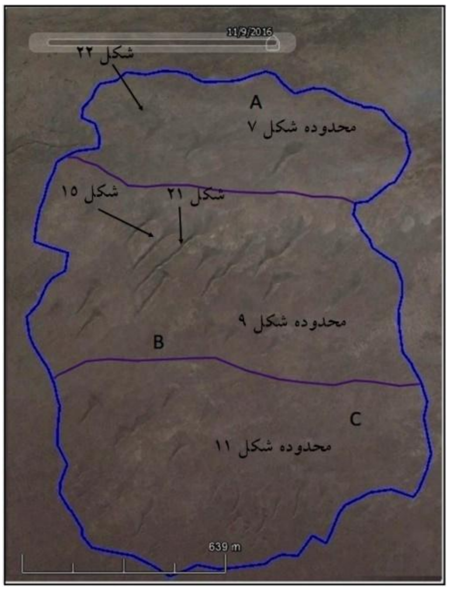
DP	
N= 3.1	S= 11.9
NE= 2.8	SW= 22.6
E= 29.8	W= 72.8
SE= 5.4	NW= 53.6

Qs= 6.5 Kg/m.s >>>> TSF= 18978.55 Kg/m.Year
RQs= 2.95 Kg/m.s >>>> DSF= 8618.01 Kg/m.Year

شکل ۵- گلماسه‌ی سالانه ایستگاه سینوپتیک قم در دوره آماری ۱۳۹۵-۱۳٦۹

۳-۲- مرفولوژی و تکامل تپه‌های ماسه‌ای ارگ

ازآنجاکه این تپه‌های ماسه‌ای طی سال‌های اخیر به وجود آمده‌اند، معمولاً تپه‌های جوان بوده بنابراین فعال می‌باشند. طبق شواهد موجود، این تپه‌ها در طی دهه‌های اخیر گسترش داشته و وسعت آن‌ها در طی این مدت به ۲۲۷ هکتار رسیده است. مطالعه تپه‌های ارگ، سه منطقه کاملاً مشخص را نشان داد (شکل ٦).

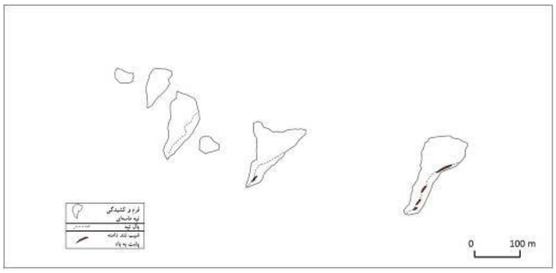


شکل ٦- مناطق تفکیک شده در ارگ با مرفولوژی متفاوت و محل تپه‌های تفسیر شده در متن

– منطقه شمال ارگ (A)، منطقه بالادست باد (upwind)، شامل تپه‌های اولیه و جوان ازجمله سپر، سپر بارخانی، بارخان نامتقارن دو وجهی و ترکیب سیف – بارخان نامتقارن خطی می‌شود (شکل‌های ۷ و ۸).



شکل ۷- مرفولوژی و تکامل تپه‌های ماسه‌ای بخش شمالی ارگ در تصویر ماهواره

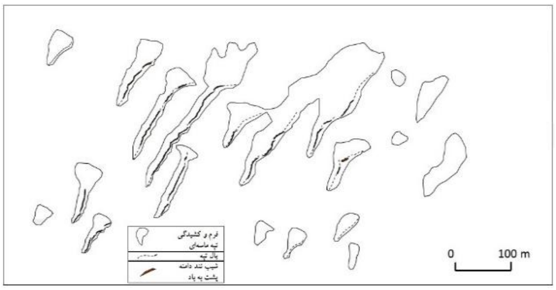


شکل ۸- الگوی مرفولوژی و تکامل تپه‌های ماسه‌ای بخش شمالی ارگ

– منطقه میانی ارگ (B)، که بیشتر شامل تپه‌های تکامل یافته خطی با ابعاد بزرگ‌تر از نظر طول، عرض و ارتفاع و در نتیجه حجم بزرگ‌تر می‌گردد. اثرات شکل‌دهی سه جهت باد در این تپه‌ها مشهودتر است (شکل‌های ۹ و ۱۰).

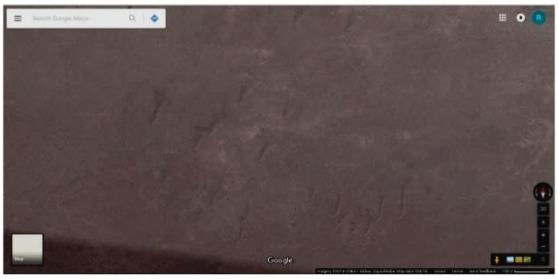


شکل ۹- مرفولوژی و تکامل تپه‌های ماسه‌ای بخش میانی ارگ در تصاویر ماهواره

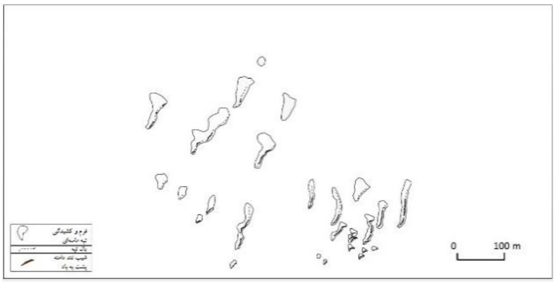


شکل ۱۰- کروکی مرفولوژی و تکامل تپه‌های ماسه‌ای بخش میانی ارگ

– منطقه جنوبی ارگ (C)، منطقه پائین‌دست باد (downwind)، که شامل انواع تپه‌ها بارخان و تپه‌های خطی ساده کمی تحول‌یافته (سیف) با اندازه‌های بسیار کوچک‌تر از تپه‌های خطی شمالی و میانی هستند (شکل ۱۱ و ۱۲). مشاهدات صحرایی نشان داد که مرفولوژی تپه‌ها در این منطقه بیشتر تحت تأثیر بادهای قوی‌تر با تداوم بیشتر یعنی بادهای شمال‌غرب شکل می‌گیرند.

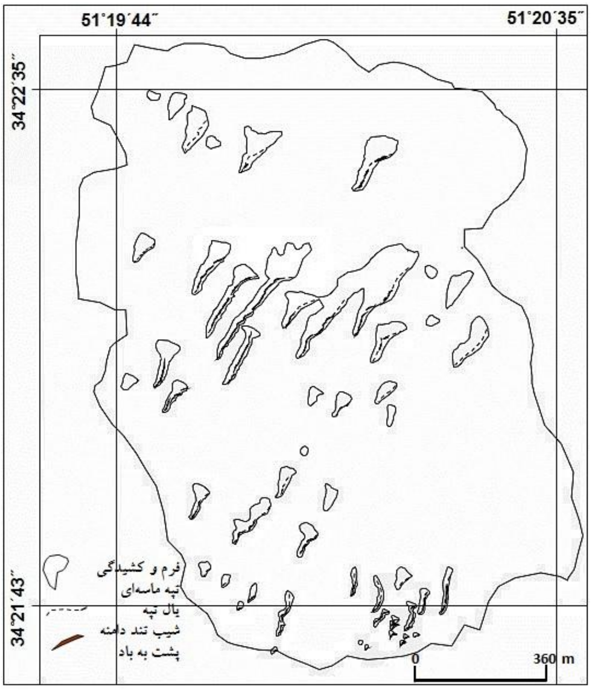


شکل ۱۱- مرفولوژی و تکامل تپه‌های ماسه‌ای بخش جنوبی ارگ در تصاویر ماهواره



شکل ۱۲- کروکی مرفولوژی و تکامل تپه‌های ماسه‌ای بخش جنوبی ارگ

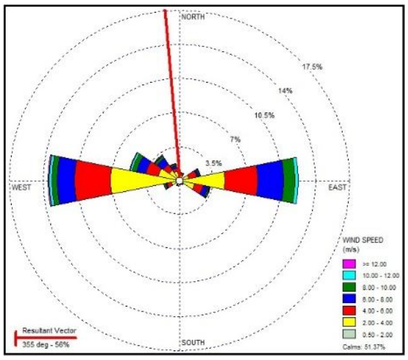
تکامل تپه‌های ماسه‌ای بر اساس مشاهدات صحرایی و تفسیر تصاویر ماهواره نشان داد که دو سیستم تکاملی برای تپه‌های خطی منطقه قابل‌تشخیص است. یکی شکل‌گیری تپه‌های خطی از تپه سپر به سپر بارخانی و سپس به بارخان نامتقارن و نهایتاً به تپه خطی ساده یا سیف (شکل ۷ و ۸)، و دیگری سیستم تکاملی تپه سپر به تپه دوکی شکل گوه‌ای (wedge) و سپس به تپه خطی ساده یا سیف (شکل ۱۱ و ۱۲). سیستم تکاملی اول در بالا دست باد جایی که قدرت باد زیاد است و سیستم تکاملی دوم در پائین‌دست باد جایی که قدرت باد کاسته می‌شود، رخ می‌دهد. شکل ۱۳ کروکی پیوستگی انواع تپه‌های ماسه‌ای را در ارگ نشان می‌دهد.



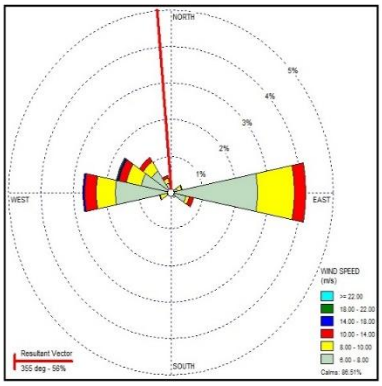
شکل ۱۳- کروکی پیوستگی مرفولوژی و تکامل تپه‌های ماسه‌ای ارگ بر اساس شکل ٦

۳-۳- الگوهای باد و شار ماسه

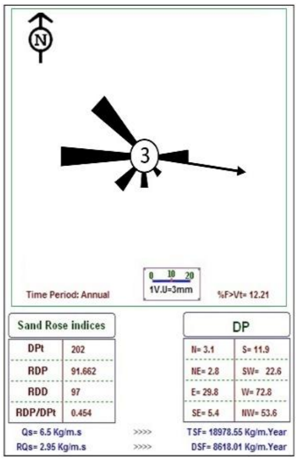
شکل ۱٦ نشانگر گل‌باد، گل‌توفان و گلماسه در ایستگاه قم برای یک دوره زمانی بیست‌وشش‌ساله از ۱۳٦۹ تا ۱۳۹۵ است. گل‌باد، گل‌توفان و گلماسه پراکندگی زاویه‌ای جریان هوا و انتقال رسوب را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۱٤ نشان داده شده است، یک رژیم باد دو جهته واضح در هر دو شکل گل‌باد و گل‌توفان با یک پیک اول در جهت غرب و شمالغرب با سرعت‌های بالا و فراوانی کمتر و یک پیک دوم در جهت شرق با سرعت پایین‌تر و فراوانی بیشتر وجود دارد. جهت بادهای متفاوت در ارتباط با تغییرات فصلی منطقه است (حسنی و همکاران، ۱۳۹٦).



گل‌باد (باد با فراوانی زیاد-باد چیره)



گل‌توفان (باد فرساینده)



گل‌ماسه (شار ماسه)

شکل ۱٤- رژیم باد در ایستگاه قم برای یک دوره زمانی بیست‌وشش‌ساله از ۱۳٦۹ تا ۱۳۹۵. باد غالب و باد فرساینده به‌طورکلی دارای جهت یکسان هستند و شار ماسه، از تغییرات باد فرساینده یعنی گل‌توفان پیروی می‌کند.

۳-٤- الگوهای رژیم باد و فرم تپه ماسه‌ای

- تئوری تکامل زمانی و گسترش تپه سپر تحت رژیم‌های باد جهته

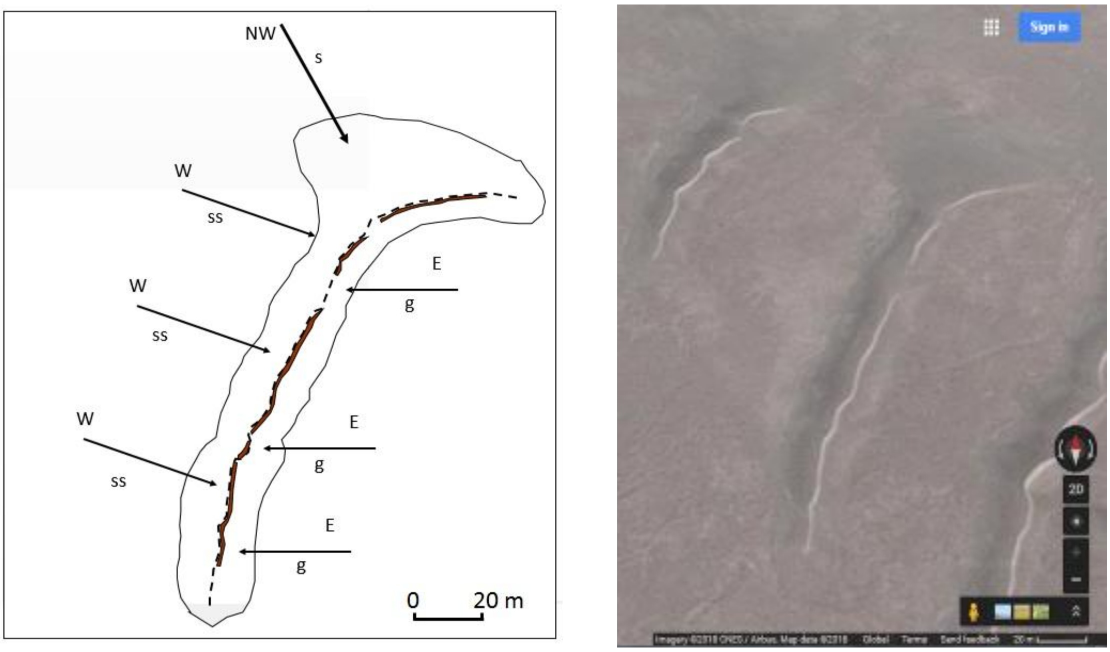
بادهای دو جهته، بادهایی که به‌طور دوره‌ای بین دو جهت اصلی نوسان دارند، و زمانی نامتقارن هستند که نرخ انتقال هر دو جهت باد برابر نباشد (بگنولد، ۱۹٤۱؛ تسوار، ۱۹۸٤).

اولین مدل مفهومی این تئوری توسط باگنولد (۱۹٤۱) بوده است. بر اساس این مدل، در یک بارخان متقارن حاصل از سپر بارخانی، و ایجاد شده توسط باد ملایم (g)، اگر باد طوفانی (قوی =s) از جهت ثانویه بورزد، نامتقارن می‌شود و یک زاویه واگرایی حاد با باد اصلی ایجاد می‌کند. بخشی از تپه که در معرض باد

طوفانی قرار می‌گیرد، در طرف مقابل، کشیده می‌شود، بنابراین به یک تپه سیف طولی تبدیل می‌گردد (شکل ۱).

مدل متفاوتی بعداً توسط تسوار (۱۹۸٤) پیشنهاد شد. به این صورت که، یک باد قوی (s) تپه بارخان را شکل داده و یک باد ملایم (g) (نه باد طوفانی) از جهت ثانویه می‌ورزد، و اندامی که کشیده می‌شود، نقطه مقابل باد ملایم ثانویه است (تسوار، ۱۹۸٤) (شکل ۱).

بر پایه این دو تئوری و با توجه به آنالیز باد (شکل ۳ و ٤) و بر اساس مشاهدات صحرایی و مرفولوژی تپه‌ها، می‌توان بیان کرد که الگوی شکل دهنده و تکامل تپه‌های خطی منطقه از تئوری ارائه شده توسط تسوار (۱۹۸٤) پیروی می‌کند، به‌طوری‌که باد قوی شمالغرب باعث تشکیل و شکل‌گیری اولیه بارخان می‌شود و سپس باد ملایم شرقی باعث رشد و کشیدگی بازوی سمت غرب بارخان می‌شود. از این مرحله به بعد دنباله به وجود آمده، تحت تأثیر دو باد غربی و شرقی که دارای زاویه برخورد نزدیک ۱۸۰ درجه هستند به‌صورت تپه رفت و برگشتی (reversing dunes) در آمده و کمی متمایل به جنوب غرب گسترش و تکامل پیدا می‌کنند (شکل ۱۵).

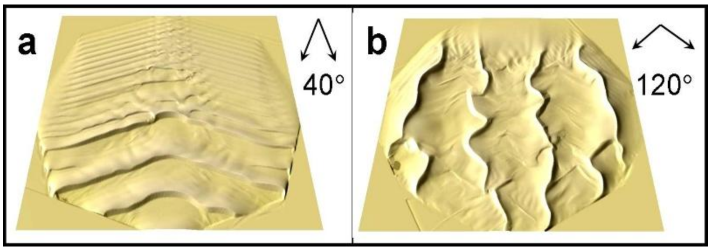


شکل ۱۵- مدل توسعه تپه سیف از بارخان برای منطقه موردمطالعه، s : باد قوی وss: باد نیمه قوی و g: باد ملایم E: جهت شرق W: جهت غرب و NW: شمالغرب

– تئوری گسترش تپه خطی با بزرگی و زاویه بین دو باد غالب یا فرساینده

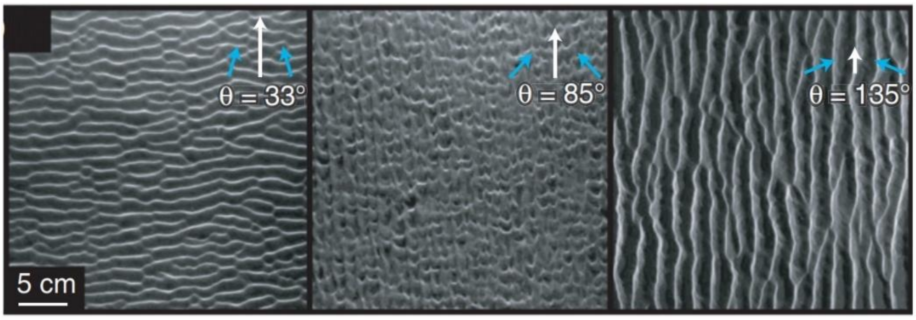
هنگامی که بزرگی هر دو باد قابل‌مقایسه باشند، روند تپه‌ها تنها، به زاویه بین دو جهت حمل بستگی دارد (روبین و هانتر ۱۹۸۷; روبین و ایکدا ۱۹۹۰ و پارتلی و همکاران ۲۰۰۹).

تئوری مرفولوژی تپه‌های خطی سیف با اندازه زاویه بین دو جهت باد را پارتلی و همکاران (۲۰۰۷) به‌صورت آزمایشگاهی، در بستر ماسه‌ای تخت (flat) با استفاده از یک رژیم باد دو جهته انجام دادند. آن‌ها دریافتند که عرصه‌های تپه‌های خطی سیف را می‌توان فقط برای زوایای بزرگ‌تر از ۹۰ درجه مشاهده کرد (شکل ۱٦ b)، و برای زوایای کوچک‌تر از ۹۰ درجه، تپه‌های عرضی با دامنه با شیب کم، در جهت باد، به دست می‌آید (شکل ۱٦ a).



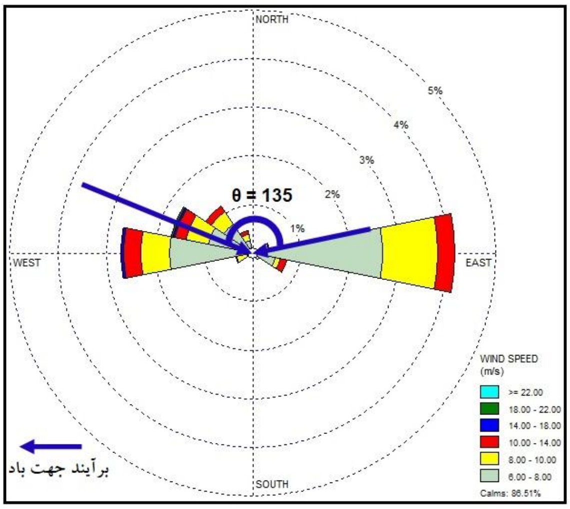
شکل ۱٦– ظهور تپه‌ها تحت رژیم باد دو جهته

موضوع بزرگی و زاویه بین دو باد غالب یا فرساینده توسط رفعت و همکاران (۲۰۱۰) نیز به‌صورت آزمایشگاهی و در بستر ماسه‌ای تخت و در محدوده ۰ تا ۱۸۰ درجه انجام گرفته است (شکل ۱۷). آن‌ها دریافتند که تپه‌های عرضی برای $\theta \leq 90$ درجه، درحالی‌که تپه‌های طولی در برای درجه دیده می‌شود.



شکل ۱۷– رشد تپه‌های آزمایشی در یک بستر ماسه‌ای که توسط وزش دو باد ایجاد شده‌اند. برای θ برابر ۳۳ درجه، شکل تپه‌ها عرضی، برای θ برابر ۱۳۵ درجه شکل تپه‌ها طولی، درحالی‌که برای θ برابر ۸۵ درجه، یک حالت انتقال

بر اساس تئوری‌های ارائه شده در بالا، مطالعات بر روی تپه‌های ماسه‌ای منطقه صورت گرفت. بـر پایـه مطالعات گل‌توفان، زاویه ایجاد شده بین برآیند بادهای غربی و شرقی محاسـبه گردیـد، و مرفولـوژی تپـه‌هـا به‌ویژه کشیدگی آن‌ها با زاویه دو جهت باد بررسی شد (شکل ۱۸).



شکل ۱۸- برآورد زاویه بین برآیند بادهای شرقی و غربی

همان‌گونه که شکل ۱۸ نشان می‌دهد زاویه بین برآیند بادهای شرقی و غربی حدود ۱۳۵ درجه است.

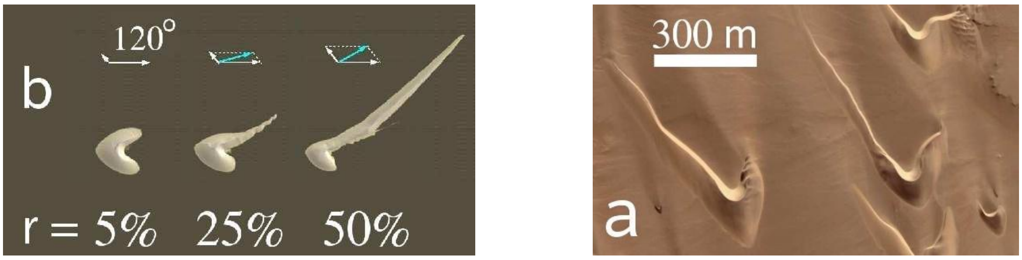
- تئوری گسترش تپه خطی با نسبت وزش باد در یک جهت به وزش باد در جهت دیگر

بررسی‌ها و شبیه‌سازی‌ها نشان داده است که به‌جز زاویه بین دو باد غالب، میزان زمان وزش نیز در تحول شکل تپه‌های خطی نیز مؤثر است. مطالعات پارتلی و همکاران (۲۰۰۹) از شبیه‌سازی تپـه‌هـای خطـی نشـان داده که هر دو زمان و زاویه در تحول شـکل‌گیـری تپـه‌هـای خطـی مهـم اسـت. مشـاهدات و شـبیه‌سـازی شکل‌گیری تپه ماسه‌ای خطی سیف از یک بارخان برای $\theta\ w = ۱۲۰$ در شکل ۱۹ نشان داده شـده اسـت. بـر اساس این مطالعات مشخص شده که تکامل تپه ماسه‌ای بستگی به نسبت زمان وزش باد در یـک جهـت بـه زمان وزش باد در جهت دیگر دارد (رابطه ۱).

$$r = Tw2 / Tw1 \quad (۱)$$

(Tw2 زمان وزش باد ثانویه و Tw1 زمان وزش باد اولیه)، همان‌گونه که شکل ۱۹ نشان می‌دهد در $r \leq 5\%$ یعنی نسبت بین زمان‌های وزش دو باد کمتر از ۵ درصد باشد، شکل بارخان تغییر نمی‌کند. زمانی که

این نسبت بیشتر از ۲۵ درصد می‌شود (r>25%)، بازوی بارخان تنها در جهت برآیند کشیده می‌شود. علاوه بر این، اگر این نسبت افزایش یابد، سرعت کشیدگی بازو نیز افزایش می‌یابد.



شکل ۱۹- a: ظهور تپه‌های سیف از یک بازوی بارخان‌ها در نامیبیا، b: برآورد محاسباتی: شکل تپه متأثر از عملکرد r = Tw2 / Tw1 نسبت بین تداوم جهت باد است.

مطالعات مرفولوژی تپه‌های ماسه‌ای منطقه بر اساس این تئوری و با توجه به گل‌توفان صورت گرفت. بر اساس تجربه و رابطه اریک پارتلی و با توجه به داده‌های میدانی، در این پژوهش، برای فرم‌دهی و کشیدگی تپه‌ها، از نسبت فراوانی وزنی جهت بادها به جای نسبت زمانی استفاده شده است.

$$r = Fw2 / Fw1 \qquad (۲)$$

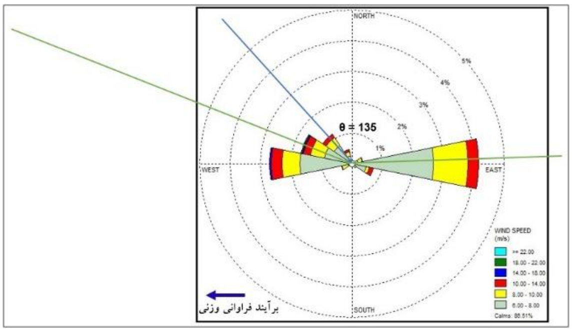
بدین ترتیب، که در آن Fw2 فراوانی وزنی باد ثانویه (شرقی) و Fw1 فراوانی وزنی باد اولیه (شمال‌غربی و غرب) و r نسبت فراوانی وزنی این دو باد است.

این اطلاعات از نرم‌افزار WRplot، منوی Frequency Distribution و داده‌های گل‌توفان فصلی به دست آورده شد. برای مثال: فراوانی باد برای بادهای غربی به‌صورت زیر محاسبه گردیده است.

$$\text{فراوانی وزنی} = \text{فراوانی فصلی وقوع} * \frac{(\text{فراوانی هر طبقه سرعت} * \text{سرعت متوسط هر طبقه سرعت} + \text{فراوانی هر طبقه سرعت} * \text{سرعت متوسط هر طبقه سرعت} + \dots)}{\text{مجموع سرعت متوسط طبقات}} \qquad (۳)$$

$$\text{فراوانی وزنی باد غربی} = \frac{(۳)}{۴} * \frac{(۵۰*۷) + (۱۷*۹) + (۱۰*۱۲ + (۲*۱۶)}{۴۴} = ۱۱/۲$$

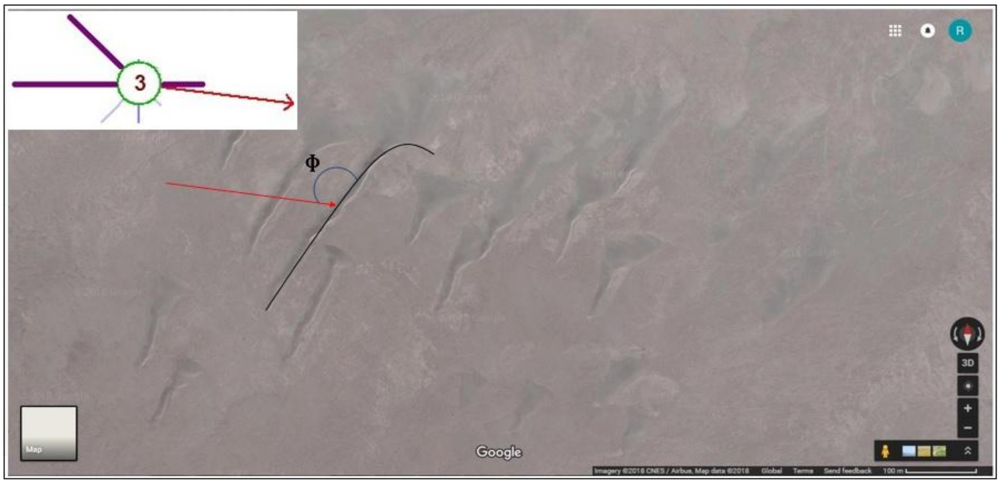
بر اساس رابطه ۳، فراوانی وزنی بادهای شمال‌غرب و غرب ازیک‌طرف و فراوانی وزنی بادهای شمال‌شرق و شرق از طرف دیگر محاسبه گردید و برآیند آن‌ها برای بادهای غربی به‌عنوان باد اولیه برابر ۱۱ و برای بادهای شرقی به‌عنوان باد ثانویه برابر ۴/۷ به دست آمد، بنابراین مقدار r بر اساس رابطه ۲ برابر ۰/۴۲ یا ۴۲ درصد می‌شود که طبق برآورد اریک پارتلی و همکاران (۲۰۰۷)، زمانی که این نسبت بیشتر از ۲۵ درصد می‌شود (r> 0.25)، بازوی بارخان تنها در جهت برآیند دو باد کشیده می‌شود (شکل ۲۰).



شکل ۲۰- برآورد زاویه بین برآیند فراوانی بادهای شرقی و غربی

۳-۵- الگوهای شار ماسه و فرم تپه ماسه‌ای

هنگامی که باد دارای دو جهت غالب است، علاوه بر الگوهای ارائه شده در بالا، روند شکل‌گیری تپه‌ها، می‌تواند با توجه به زاویه ϕ، زاویه بین جهت تاج تپه و جهت برآیند شار ماسه، طبقه‌بندی شود، که معمولاً در ϕ بیشتر از ۷۵ درجه تپه‌ها به‌صورت تپه عرضی و در ϕ بین ۱۵ تا ۷۵ درجه تپه‌ها مایل و در ϕ کمتر از ۱۵ درجه تپه‌ها طولی شناسایی شده‌اند (هانتر و همکاران، ۱۹۸۳). مطالعات نشان داد که زاویه بین جهت تاج تپه و جهت برآیند شار ماسه، در منطقه ۱۳۵ درجه است (شکل ۲۱).



شکل ۲۱- برآورد زاویه بین جهت تاج تپه و جهت برآیند شار ماسه

٤- نتیجه‌گیری

در منطقه آب شیرین کاشان در طول سالیان اخیر، تجمعی از تپه‌های ماسه‌ای (ارگ) با مساحت حدود ۲۲۷ هکتار ایجاد شده است. وجود تپه‌های ماسه‌ای کم تحول‌یافته هلالی شکل (پیش بارخانی) تا تپه سیف، عدم استقرار پوشش گیاهی و ویژگی‌های تغییر مرفولوژی، نشان می‌دهد که ارگ مزبور فعال است.

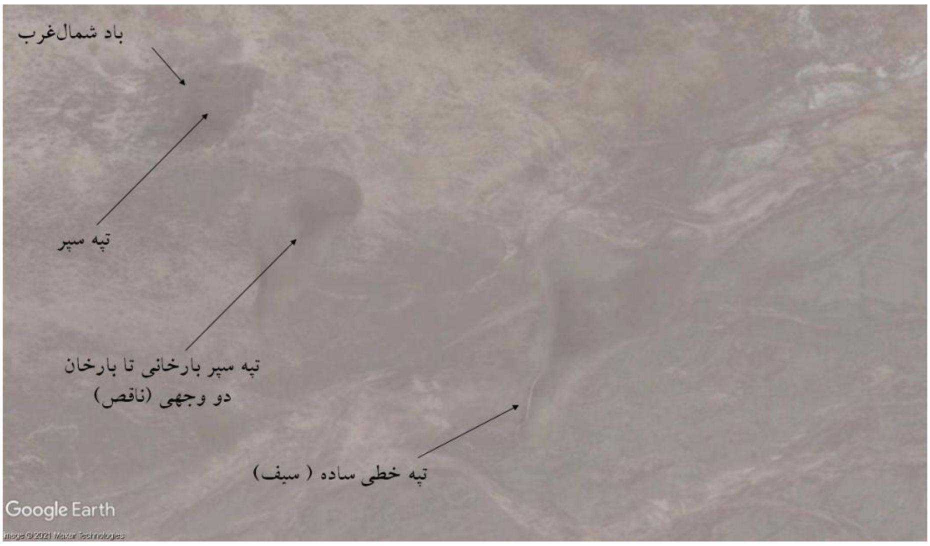
توزیع مکانی تپه‌های ماسه‌ای از شمال به‌طرف جنوب در سه بخش کاملاً آشکار است، بخش شمالی که توسط تپه‌های پیش‌بارخانی تا تپه‌های خطی ساده سیف حاصل از توسعه یک بازوی بارخان پوشش داده شده است (شکل‌های ۷ و ۸). بخش میانی که تکامل اشکال بخش شمالی بوده و تپه‌های خطی کشیده را ایجاد کرده‌اند، بعضی از این تپه‌ها به‌صورت سیلک ساده دندانه‌ای بوده و در بخش بالادست باد به هم متصل شده و در حال تشکیل شکل بسیار ابتدایی از سیلک خوشه‌ای نامتقارن می‌باشند (شکل‌های ۹ و ۱۰). بخش جنوبی ارگ که بیشتر تحت تأثیر ویژگی‌های پائین‌دست بادهای دو جهته هستند و شکل‌های تپه‌ها با ترکیب بسیار کم از تپه‌های هلالی شکل مثل بارخان نامتقارن و ترکیب بیشتر از تپه‌های خطی ساده سیف می‌باشند.

مطالعات نشان داد که گلباد و گل‌توفان ایستگاه قم از یک الگو پیروی می‌کنند، بنابراین هر دو در شکل‌دهی تپه‌ها مؤثر هستند. ولی بادهای فرساینده یا بادهای غربی و شمال‌غربی، از گل‌توفان تبعیت کرده و آورد ماسه را پشتیبانی می‌کنند (شکل‌های ۳ و ٤).

مقایسه الگوی گل‌توفان با الگوی شار ماسه (شکل ١٤) نشان داد که الگوهای توان حمل جریان (Drift Potential)، در جهت‌های مختلف با الگوی سرعت‌های باد فرساینده در جهت‌های مختلف هماهنگ هستند؛ اما برآیند سرعت و جهت بادهای فرساینده با برآیند شار ماسه، یک زاویه حدود ۱۲۰ درجه تشکیل می‌دهند و همخوانی ندارند. مطالعات حسنی (۱۳۹٦) در منطقه نشان داده است که رژیم باد دو جهته منطقه به‌طور مجزا در دو دوره اتفاق می‌افتد. بادهای شرقی با فراوانی زیاد ولی با سرعت کمتر از ١٤ متر بر ثانیه و در فصل تابستان بوده، در حالی که بادهای شمال‌غرب و غرب با فراوانی زیاد و سرعت‌های تا ۲۲ متر در ثانیه، در سه فصل پائیز، زمستان و بهار، رخ می‌دهد (حسنی و همکاران ۱۳۹٦). این فراوانی و اختلاف سرعت فصلی از یک طرف و اختلاف ژئومرفولوژی اراضی بالا دست بادهای شرقی (اراضی کویری رسی و سیلتی سخت دریاچه نمک)، با اراضی بالا دست بادهای غربی و شمال‌غربی (اراضی کشاورزی، دشت‌سرهای پوشیده با سطوح سست) باعث گردیده که برآیند شار ماسه از غرب به طرف شرق رخ دهد و زاویه‌ای بین برآیند بادها با برآیند شار ماسه ایجاد گردد و با یکدیگر همخوانی نداشته باشند. **توکلی فرد و همکاران (۱۳۹۱)**، نشان دادند که اراضی با مرفولوژی متفاوت دارای سرعت آستانه فرسایش مختلف بوده و

در نتیجه دارای شار ماسه گوناگون هستند. نارتئو[1] (۲۰۱۳) این اختلاف در الگو را نتیجه تغییرات فصلی قدرت و جهت باد می‌دانند (نارتئو و همکاران، ۲۰۱۳).

مطالعه و بررسی‌های صحرایی رابطه مرفولوژی و کشیدگی تپه‌ها با جهت و سرعت باد، نشان داد که این الگوها بیشتر از گل‌توفان پیروی می‌کنند، بطوری که، بادهای شمال‌غرب که قوی‌ترین بادها از نظر سرعت و فراوانی می‌باشند باعث تشکیل تپه‌های پیش بارخانی (سپر و سپر بارخانی) می‌شود، به‌این‌ترتیب که ابتدا یک توده مخروطی شکل تشکیل شده (سپر) که با آورد ماسه، ارتفاع این توده زیاد شده و منجر به تشکیل یک تاج عمود بر جهت باد و هم زمان یک دامنه پرشیب در پائین‌دست باد می‌گردد (سپر بارخانی). درنهایت با توجه به حفظ شدن توده اصلی تپه، کناره‌های کم‌حجم آن، بیشتر از بالای آن گسترش‌یافته و توده به شکل هلالی با بازوهای بلند تبدیل می‌گیرد (بارخان). در مرحله بعد بادهای غربی عمل کرده و با تأثیر بر شکل بارخان‌ها باعث کشیدگی بازوی غربی بارخان‌ها شده و شکل اولیه سیف را به وجود می‌آورد (شکل ۲۲). تأثیر بادهای غربی و شرقی را می‌توان در توسعه این بازو مشاهده کرد، بطوریکه این دو باد با توجه به زاویه حدود ۱۸۰ درجه بین آن‌ها، تشکیل تپه‌های رفت و برگشتی را باعث می‌شوند (سیف دندانه‌ای). مرفولوژی دامنه‌های سیف‌های دندانه‌ای، از فراوانی و سرعت بادهای غربی و شرقی پیروی می‌کنند؛ به‌طوری‌که بادهای غربی، تپه‌های بزرگ‌تر (از نظر ابعاد) با شیب ملایم به سمت غرب را ایجاد کرده و بادهای شرقی فقط به‌عنوان باد تکامل‌دهنده در کشیدگی شکل تپه‌ها عمل می‌کنند (شکل ۱۵). این مشاهدات صحرایی و بررسی‌ها نشان داد که تکامل این نوع مرفولوژی از تئوری ارائه شده توسط تسوار (۱۹۸٤) پیروی می‌کند.



شکل ۲۲- تئوری تکامل تپه‌های ماسه‌ای بر اساس الگوهای رژیم باد و فرم تپه ماسه‌ای

1 Narteau

همچنین مطالعات شکل‌گیری تپه‌ها با الگوی بادهای فرساینده نشان داد که تپه‌های خطی منطقه در زاویه ۱۳۵ درجه ایجاد شده بین برآیندهای این بادها شکل گرفته‌اند (شکل ۱۸). کارهای آزمایشگاهی پارتلی و همکاران (۲۰۰۷) و رفعت و همکاران (۲۰۱۰)، در بستر ماسه‌ای تخت، با استفاده از یک رژیم باد دو جهته، نیز زوایای بیشتر از ۹۰ درجه بین بادهای فرساینده را برای تشکیل تپه‌ها خطی تائید می‌کند.

این مطالعه همچنین به گسترش و تکامل تپه‌ها بر اساس فراوانی بادهای فرساینده به جای زمان وزش باد پرداخت. مطالعات نشان داد که نسبت فراوانی بادها می‌تواند جایگزین مناسبی برای نسبت زمان وزش بادها قرار گیرد.

بررسی‌های الگوهای شار ماسه و فرم تپه ماسه‌ای نشان داد که زاویه بین جهت تاج تپه و جهت برآیند شار ماسه، در منطقه ۱۳۵ درجه است. که با مطالعات هانتر و همکاران (۱۹۸۳) تفاوت دارد. به‌طوری‌که آن‌ها اندازه زاویه برای تپه‌های مایل را تا ۷۵ درجه ذکر کرده‌اند. این اختلاف می‌تواند اول به دلیل آزمایشگاهی بودن کار هانتر و دوم، همان‌طور که بیان شد، به دلیل نامتعادل بودن تغییرات فصلی در جهت و سرعت باد منطقه باشد.

به‌طورکلی بر اساس مشاهدات میدانی، تفسیر تصاویر ماهواره‌ای از تپه‌های ماسه‌ای و تجزیه‌وتحلیل خصوصیات باد می‌توان بیان کرد که ارگ مزبور ارگی فعال است، بنابراین پتانسیل گسترش مکانی زیادی دارد. آنالیزهای بادسنجی نشان داد که در ایجاد این ارگ، بادهای دوجهته غربی (شمالغرب و غرب) در وهله اول و بادهای شرقی در وهله دوم در آورد ماسه و شکل‌دهی، دارای اهمیت هستند. در حقیقت منابع ماسه در قطاع شمال‌غرب تا غرب و در شرق قرار دارند. از طرفی با توجه به ژئومرفولوژی اراضی این قطاع‌ها می‌توان بیان کرد که منابع ماسه در قطاع شمال غرب تا غرب فعال‌تر هستند. مطالعات اولیه صحرایی نشان داد که تغییرات وسیع و گسترده کاربری زمین در شمال غرب و غرب می‌تواند علت اصلی برای تشکیل این ارگ در منطقه باشد. مطالعه مشهدی و همکاران (۱۳۹۹) نشان داده که تغییرات کاربری اراضی تأثیر قابل‌ملاحظه روی تعادل طبیعی فرایند بادی داشته و سه ویژگی ظرفیت حمل باد، تأمین رسوب و قابلیت دسترسی به رسوب برای باد را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بنابراین پیشنهاد می‌گردد مطالعه و پژوهشی در این موضوع صورت گیرد.

کتابنامه

– حسنی درآباد، فرهاد؛ مشهدی، ناصر؛ ١٣٩٦. ارتباط گلباد و گلتوفان با دوره‌های خشک و مرطوب منحنی نرمال آمبروترمیک (بررسی موردی: ایستگاه سینوپتیک قم)، *مجموعه مقالات کنفرانس بین‌المللی مدیریت منابع طبیعی در کشورهای درحال‌توسعه*، کرج.
https://civilica.com/doc/780619

– توکلی فرد، اصغر؛ قاسمیه، هدی؛ نظری سامانی، علی اکبر؛ مشهدی، ناصر؛ میرزاوند محمد؛ ۱۳۹۱. بررسی نقش اراضی مختلف در توفان‌های ماسه‌ای با استفاده از گلباد و گل‌توفان (مطالعه موردی: کاشان). *پژوهش‌های فرسایش محیطی*. شماره ۲. صص ۲۵–۴۱ .
https://magazine.hormozgan.ac.ir/article-1-103-fa.html

- Bagnold, R.A., 1941. The Physics of Wind Blown Sand and Desert Dunes, vol. 265 (10), 244 pp. Methuen & Co., London. https://link.springer.com/book/10.1007/978-94-009-5682-7.
- Bagnold, R.A., 2012. The physics of blown sand and desert dunes. Courier Corporation. https://link.springer.com/book/10.1007/978-94-009-5682-7.
- Cooke, R.U., Warren, A. and Goudie, A.S., 1993. Desert geomorphology. CRC Press. https://doi.org/10.2307/622457.
- Fryberger, S.G. and Dean, G., 1979. Dune forms and wind regime. In A study of global sand seas (Vol. 1052, pp. 137-169). US Government Printing Office Washington. https://doi.org/10.3133/pp1052.
- Ghorbani, A. and Pakravan, M., 2013. Land use mapping using visual vs. digital image interpretation of TM and Google earth derived imagery in Shrivan-Darasi watershed (Northwest of Iran). European Journal of Experimental Biology, 3 (1), pp.576-582. https://www.primescholars.com/articles/bhba-nefa-and-ldh-have-changed-in-fatty-liver-syndromean-abattoirbased-study.pdf.
- Hunter, R.E., Richmond, B.M. and Rho Alpha, T.A.U., 1983. Storm-controlled oblique dunes of the Oregon coast. Geological Society of America Bulletin, 94(12), pp.1450-1465. https://doi.org/10.1130/0016-7606(1983)94<1450:SODOTO>2.0.CO;2.
- Kocurek, G. and Ewing, R.C., 2005. Aeolian dune field self-organization–implications for the formation of simple versus complex dune-field patterns. Geomorphology, 72(1-4), pp.94-105. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.05.005.
- Lancaster, N., 1982. Linear dunes. Progress in Physical Geography, 6(4), pp.475-504. http://ppg.sagepub.com/content/13/1/67.
- Mainguet, M. (1986). The wind and desertification processes in the Saharo-Sahelian and Sahelian regions. In Physics of desertification (pp. 210-240). Dordrecht: Springer Netherlands.
- Mashhadi, N., AHMADI, H., Ekhtesasi, M. R., FEYZNIA, S., & Feghhi, G. (2007). Analysis of sand dunes to determine wind direction and detect sand source sites (case study: Khartooran Erg, Iran). https://jdesert.ut.ac.ir/article_31068_a0a022a6702aeb4427d51f070eee7f07.pdf.
- McKee, E.D., 1979. A study of global sand seas (Vol. 1052). US Government Printing Office. https://doi.org/10.3133/pp1052.
- Narteau, C., Ping, L., Dong, Z., Zhang, Z. and Courrech Du Pont, S., 2013, December. Emergence of oblique dunes in a landscape-scale experiment. In AGU Fall Meeting Abstracts (Vol. 2013, pp. EP43F-02). https://doi.org/10.1038/ngeo2047.
- Parteli, E.J., Durán, O., Tsoar, H., Schwämmle, V. and Herrmann, H.J., 2009. Dune formation under bimodal winds. Proceedings of the National Academy of Sciences, 106(52), pp.22085-22089. https://doi.org/10.1073/pnas.0808646106.
- Pye, K. and Tsoar, H., 2008. Aeolian sand and sand dunes. Springer Science & Business Media. https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-540-85910-9.
- Reffet, E., Courrech du Pont, S., Hersen, P. and Douady, S., 2010. Formation and stability of transverse and longitudinal sand dunes. Geology, 38(6), pp.491-494. https://doi.org/10.1130/G30894.1.

- Rubin, D.M. and Hunter, R.E., 1987. Bedform alignment in directionally varying flows. Science, 237(4812), pp.276-278. https://www.science.org/doi/10.1126/science.237.4812.276.
- Rubin, D.M. and Ikeda, H., 1990. Flume experiments on the alignment of transverse, oblique, and longitudinal dunes in directionally varying flows. Sedimentology, 37(4), pp.673-684. https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1990.tb00628.x.
- Rubin, D.M., Tsoar, H. and Blumberg, D.G., 2008. A second look at western Sinai seif dunes and their lateral migration. Geomorphology, 93(3-4), pp.335-342. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.03.004.
- Tsoar, H., 1984. The formation of seif dunes from barchans-a discussion. Zeitschrift fur Geomorphologie, 28(1), pp.99-103. https://cris.bgu.ac.il/en/publications/the-formation-of-seif-dunes-from-barchans-a-discussion.
- Tsoar, H., Blumberg, D.G. and Stoler, Y., 2004. Elongation and migration of sand dunes. Geomorphology, 57(3-4), pp.293-302. https://doi.org/10.1016/S0169-555X(03)00161-2.
- Werner, B.T. and Kocurek, G., 1997. Bed-form dynamics: Does the tail wag the dog? Geology, 25(9), pp.771-774. https://doi.org/10.1130/0091-7613(1997)025<0771:BFDDTT>2.3.CO;2.
- Zhenda, Z., 1984. Aeolian landforms in the Taklimakan Desert. In Deserts and arid lands (pp. 133-143). Dordrecht: Springer Netherlands.